

КРИЗИС ТЕПЛОТДАЧИ, ЛОКАЛЬНЫЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ВЕРИФИКАЦИЯ РАСЧЕТНЫХ КОДОВ ТВС ВВЭР

А.Д.Ефанов, А.П.Колмаков, В.В.Ложкин, А.М.Смирнов
Государственный научный центр Российской Федерации Физико-энергетический институт имени академика А.И. Лейпунского, г. Обнинск
Факс: (095) 2302326, E-mail: vvl @ ippe.obninsk.com

В.И. Абрамов, Е.И. Левин
Опытное конструкторское бюро «Гидропресс», г.Подольск
Факс: (0967) 542733, E-mail: grpress @ grpress.podolsk.ru

Представлены результаты экспериментальных исследований критических тепловых потоков и распределения локальных подогревов теплоносителя по сечению на 19-стержневых моделях ТВС реактора ВВЭР-1000. Полученные опытные данные использованы для верификационных расчетов по программам ПУЧОК-1000 (ОКБ ГП) и ВЯЗ-196 (ФЭИ).

Введение

В настоящее время активизировались работы по теплофизическому обоснованию топлива для реакторов ВВЭР. Это связано с разработкой новых видов топлива, имеющего более высокие экономические и эксплуатационные показатели. В частности, для предотвращения застревания поглощающих стержней органов регулирования СУЗ в направляющих каналах, ОКБ «Гидропресс» предложило улучшенный вид топлива с увеличенным диаметром направляющих каналов. В этом случае существенно уменьшаются гидравлические диаметры ячеек, примыкающих к направляющим каналам. Что может привести к увеличению подогревов теплоносителя в таких ячейках и уменьшить запасы до кризиса теплообмена в активной зоне.

Верифицированный по запасам до кризиса теплообмена код ПУЧОК-1000 [1] и код ВЯЗ-196 [2] в настоящее время не верифицированы по моделированию ими перераспределения расхода и других теплогидравлических характеристик теплоносителя по всем ячейкам ТВС в условиях их тепловой и гидравлической неравноценности. Особенно это относится к нестандартным ячейкам. Отсюда необходимость подтверждения надежности численного определения условий возникновения кризиса теплоотдачи и величины запасов до кризиса по ячейкам ТВС.

Необходимы экспериментальные данные по распределению локальных (поячеечных) характеристик теплоносителя, по месту возникновения кризиса и величине критического теплового потока (КТП), которые позволят уточнить замыкающие соотношения, входящие в расчетные коды, и, тем самым, повысить надежность расчетных результатов.

Работа посвящена экспериментальному исследованию кризиса теплоотдачи и распределений подогревов воды по ячейкам 19-ти стержневых электрообогреваемых моделей ТВС ВВЭР с центральным обогреваемым имитатором твэла и необогреваемыми центральными элементами - имитаторами направляющего канала поглощающих стержней органов регулирования СУЗ.

1. Экспериментальное оборудование

1.1. Стенд

Опыты проведены на стенде СВД-2. Гидравлическая схема стенда - трехконтурная-основной циркуляционный контур, промежуточный контур и контур обратного водоснабжения. Основной циркуляционный контур (рис.1), содержит три петли: петлю высокого давления (ПВД), петлю среднего давления (ПСД) и петлю естественной циркуляции (ПЕЦ). Характеристики петель стенда приведены в Таблице.

Характеристики петель стенда

Параметр	ПВД	ПСД	ПЕЦ
Мощность ЭУ, МВт	11	11	11
Давление воды, МПа	25,5	19,6	7,8
Температура воды на входе в ЭУ, °С	450	350	240
Температура воды на выходе ЭУ, °С	500	450	280
Расход воды, м ³ /час	35	35	8

ПВД и ПСД имеют одинаковые принципиальные схемы (рис. 1), включающие по четыре циркуляционных насоса ЦЭН-149. Петли ПВД и ПСД работают как независимо, так и совместно при параллельном подключении на одно экспериментальное устройство. В последнем случае через экспериментальное устройство (ЭУ) возможен расход до 70 м³/ч. Такой же расход воды 70 м³/ч обеспечивает насос ЦЭНС-1459 (рис. 1).

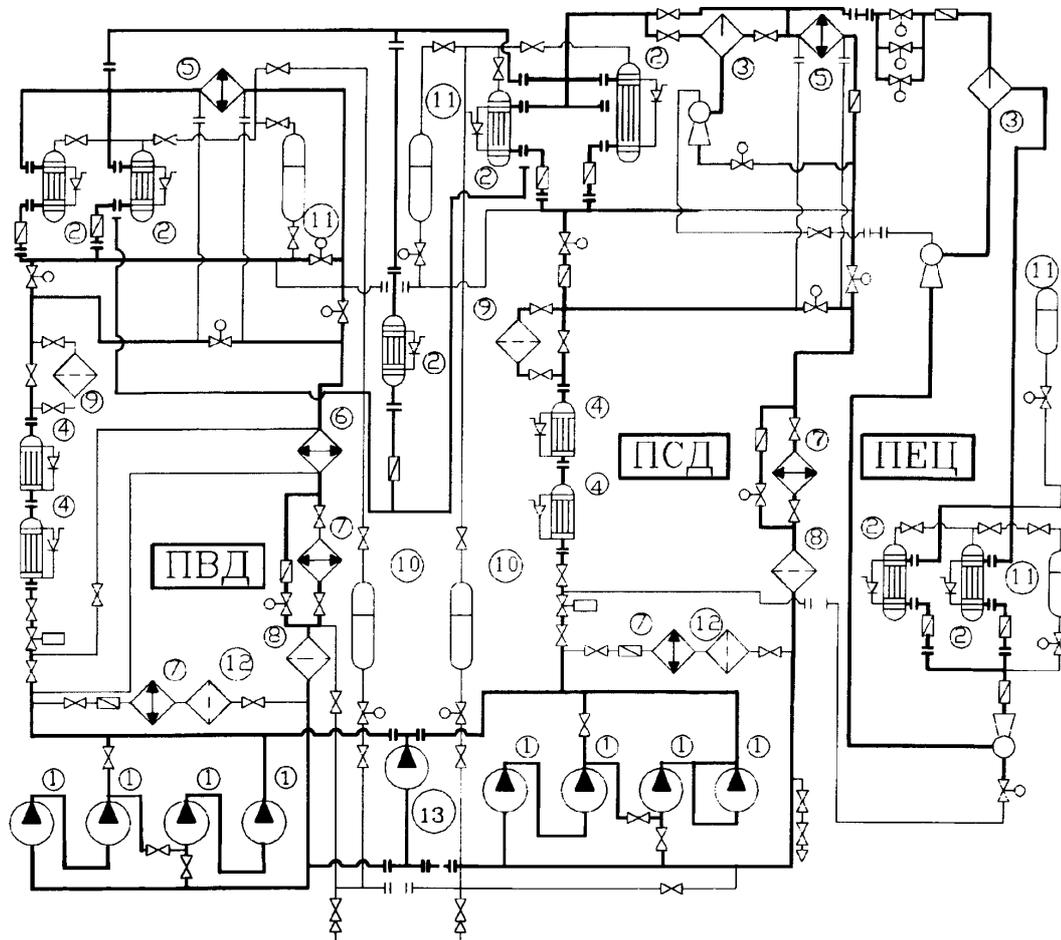


Рис.1. Схема циркуляционного контура СВД-2.

1 - циркуляционный насос (ЦЭН-149); 2 - экспериментальное устройство; 3 - сепаратор; 4 - электронагреватель; 5 - конденсатор; 6 - регенеративный подогреватель; 7 - холодильник; 8 - механический фильтр; 9 - высокотемпературный фильтр; 10 - компенсатор объема; 11 - демпфер-газовая разгрузка; ионообменный фильтр; 13 - циркуляционный насос (ЦЭНС-1459-1).

- вентиль, задвижка;
 - дренаж;
 - тиристорный регулятор;
- расходомерное устройство;
 - подпитка;
 - вентиль с электроприводом.

Электропитание производится выпрямленным током с быстродействующим тиристорным регулированием.

Для сбора, регистрации и экспрессной обработки данных используется программно-аппаратный измерительный комплекс, состоящий из аппаратной части и управляющей программы.

Аппаратная часть включает в себя усилители, блок коммутаторов и измерительно-вычислительный блок и РС АТ. Усилители рассчитаны на диапазоны 30, 45 и 60 мВ, имеют класс 0,15 и полосу пропускания 10 Гц. Блок коммутаторов и измерительно-вычислительный блок - плата L1250 фирмы L-card - рассчитаны на 512 измерительных каналов с максимальной скоростью опроса на канал 250 кГц. Погрешность измерения аппаратной части составляет $\pm 0,3\%$.

Управляющая программа разработана с учетом методик проведения опытов и позволяет:

- вести непрерывный контроль на дисплее РС основных режимных параметров стенда и ЭУ, а также дополнительно, по выбору оператора пульта управления стендом, любых измеряемых параметров;

- проводить регистрацию всех измеряемых параметров нажатием клавиши однократно (стационарный режим измерения) или многократно с заданным шагом по времени (динамический режим измерения).

1.2. Экспериментальные участки

Экспериментальными участками являлись три 19-ти стержневые электрообогреваемые модели ТВС ВВЭР.

Первый участок, В19, представлял собой пучок из 19 электрообогреваемых имитаторов твэлов ВВЭР, изготовленных из труб из стали 12Х18Н10Т размером 9,1х1мм с обогреваемой длиной 3м. Для дистанционирования имитаторов друг от друга использовались фрагменты решеток ВВЭР из 19 дистанционирующих элементов, обеспечивающие расстояние между осями имитаторов, равное 12,75мм. Шаг расположения решеток по длине пучка равен 255 мм, причем первая стояла выше зоны обогрева на 10 мм.

Второй и третий участки, В18-13,6 и В18-13,0, представляли из себя 19 стержневые сборки типа В19, в которых центральные необогреваемые элементы имитировали направляющие каналы поглощающих стержней органов регулирования СУЗ с наружным диаметром, соответственно, 13,6 и 13,0 мм. Для дистанционирования элементов друг от друга использовались такие же фрагменты решеток ВВЭР, как и для В19, но без центральной ячейки.

Экспериментальные участки располагались в шестигранном канале с размером "под ключ" 57,3 мм. Канал с тепловыделяющей сборкой размещался в корпусе экспериментальной колонки, выдерживающем давление до 20 МПа.

1.3. Измерительное оборудование

В опытах измерялись следующие параметры: давление воды на входе и выходе канала, перепад давлений на обогреваемой длине пучка, температура воды на входе и выходе колонки, расход воды через колонку, электрическое напряжение и ток через пучок, температура воды в ячейках сборки на расстоянии 10 мм от верхнего конца обогрева вверх по потоку, температура внутренних поверхностей стенок имитаторов на расстоянии 15 мм от верхнего конца обогрева вверх по потоку.

Измерение температуры внутренних поверхностей стенок имитаторов твэлов и температуры воды в ячейках сборок производилась кабельными термодарами с изолированными спаями градуировки ХК диаметром 0,5 мм. На рис.2 показана схема размещения термодар по сечению сборки В19. Оснащение сборок В18-13,6 и В18-13,0 - аналогичное. Все датчики и измерительные комплекты перед началом опытов индивидуально тарировались.

2. Программа и методика проведения опытов

Измерение критических мощностей, определение мест возникновения кризиса теплоотдачи и исследование его распространения по сечению сборки проводились в следующем диапазоне режимных параметров:

- давление воды - 12,5; 15,7 МПа;
- массовая скорость - 2000÷3600 кг/(м²с);
- температура воды на входе в колонку - 150÷320 °С.

Относительные подогревы теплоносителя в ячейках пучков стержней определялись в режимах без кипения при давлениях 12,5 и 15,7 МПа и массовых скоростях 1500, 2600, 3600 кг/(м²с).

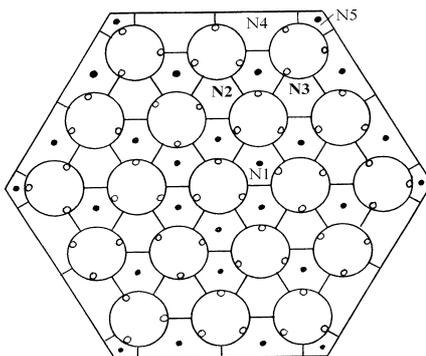


Рис.2. Схема размещения датчиков по ячейкам сборки В19.

- - термопара, измеряющая температуру стенки имитатора твэла;
- - термопара, измеряющая температуру воды в ячейке сборки;
- N1 - центральная ячейка; N2,N3 - промежуточные ячейки;
- N4 - периферийная ячейка; N5 - угловая ячейка.

Опыты проводились по следующей методике. В контуре устанавливались заданные давление, расход воды и температура воды на входе в колонку. Электрическая мощность, подводимая к пучку имитаторов твэлов, повышалась до возникновения кризиса теплоотдачи небольшими ступенями, составляющими 1÷3% от ожидаемой критической мощности. На каждом уровне мощности, после стабилизации режима, проводилась регистрация всех параметров (стационарный режим измерения). Превышение критической мощности отмечалось по резкому подъему на экране дисплея идентификатора сигнала термопары, первой зафиксировавшей возникновение кризиса теплоотдачи. Затем мощность снижалась на 3÷5% от предварительно установленной критической, и, после стабилизации режима, включался динамический режим измерения, т. е. автоматическая регистрация всех параметров одновременно с интервалом 0,1÷0,2 с. При этом мощность повышали ступенями не более 1% от критической, причем каждое последующее повышение производилось после наступления стабилизации на каждой ступени после предыдущего подъема мощности. Такой процесс продолжался до достижения температуры стенки имитаторов предельной величины 550°С.

Из анализа данных, полученных в зависимости от времени, за окончательную критическую мощность принималась величина мощности, превышение которой приводило к непропорциональному росту температуры стенки имитатора. Полученные зависимости мощности и температур стенки от времени позволили точно определить начало и место возникновения кризиса теплоотдачи и мощность, при превышении которой начинался кризис, а также характер его распределения по сечению сборки до достижения температуры в какой-либо измеряемой точке величины 550°С.

Для регистрации параметров при исследовании относительных подогревов использовался стационарный режим измерения.

3. Результаты опытов и верификация кодов

Для анализа полученных результатов опытов и проведения поочередных расчетов поперечное сечение сборки разбивалось на характерные ячейки. Схема разбиения и нумерация ячеек показаны на рис. 2.

В опытах на сборке В19 кризис первоначально всегда фиксировался какой-либо термопарой центрального имитатора и с повышением мощности распространялся на остальные термопары центрального имитатора твэла, а при высоких паросодержаниях на выходе сборки ($X \approx 0,2$) кризис проявлялся и на угловых имитаторах на сторонах, обращенных в угловые ячейки, и на некоторых имитаторах промежуточного ряда.

На сборке В18-13,6 кризис возникал практически всегда на имитаторах промежуточного ряда на сторонах, обращенных в центральные ячейки; далее он распространялся по периметру имитаторов и никогда не проявлялся на периферийном ряду имитаторов твэлов.

Места возникновения кризиса теплоотдачи в сборке В18-13,0 были на различных имитаторах на сторонах, обращенных в различные ячейки, кроме периферийных.

Исследования относительных подогревов по ячейкам сборок показали, что в исследованном диапазоне параметров характер распределения подогревов практически не зависит от массовой скорости и уровня мощности, а определяется главным образом геометрическими характеристиками сборки и изменением тепловыделения по поперечному сечению сборки. Характер распределений относительных подогревов по ячейкам исследованных сборок показан на рис.3.

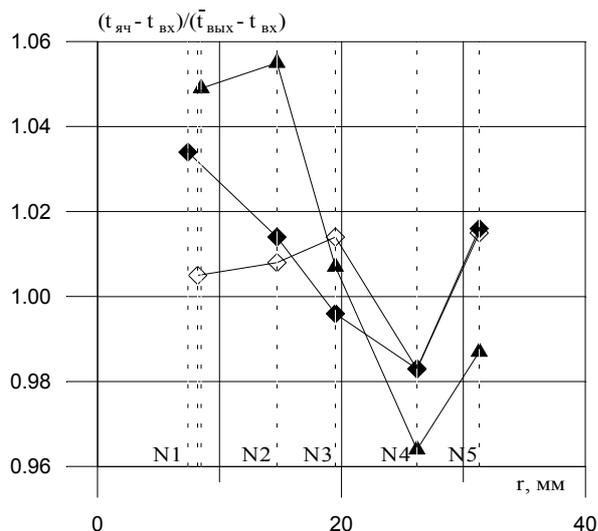


Рис.3. Относительные подогревы в ячейках сборок.

$$P=15,7 \text{ МПа}, \rho_w=2000 \text{ кг/(м}^2 \text{ с)}, t_{вх}=150 \text{ }^\circ\text{C}, q=500 \text{ кВт/м}^2.$$

◆ - В19; ◇ - В18-13,0; ▲ - В18-13,6.

Сравнение опытных данных по критическим тепловым потокам показало, что в исследованном диапазоне режимных параметров критические тепловые потоки, полученные на сборке В19 со всеми обогреваемыми элементами, выше чем на сборках с центральными необогреваемыми элементами, (рис.4). Наибольшая разница (до 15%) наблюдалась на сборке В18-13,6.

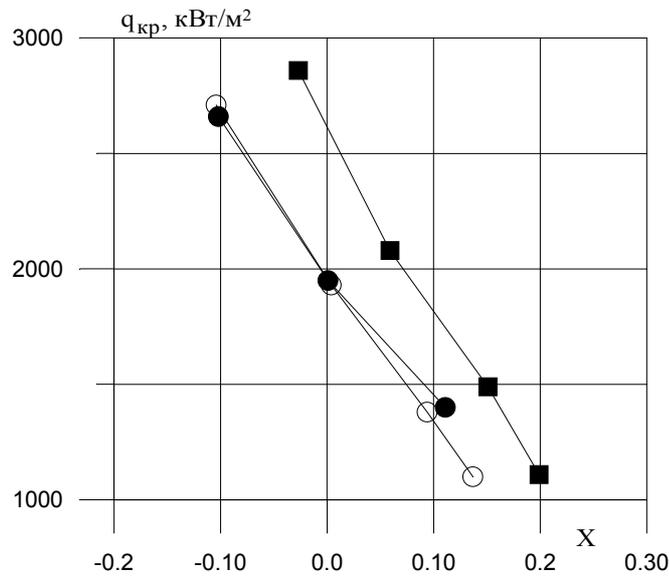


Рис.4. Зависимость критического теплового потока от критического балансного паросодержания для сборок.

при $P=15,7$ МПа и $\rho_w=3000$ кг/(м²с).
 ■ B19; ● B18-13,0; ○ B18-13,6 .

Рассчитанные по зависимости из [4] критические тепловые потоки для сборки B19 совпадают с опытными с точностью $\pm 5\%$, и выше экспериментальных до 20% для сборок B18-13,6 и B18-13,0.

Полученные опытные данные по критическому тепловому потоку и по распределению локальных (пояечечных) подогревов теплоносителя использовались для верификации расчетных кодов ПУЧОК-1000 (ОКБ ГП) и ВЯЗ-196 (ФЭИ).

При численном моделировании код ПУЧОК-1000 предсказывает критические тепловые потоки с отклонениями от экспериментальных до - 15% для сборки B19, $+5\div -15\%$ для B18-13,6 и $+6\div -10\%$ для B18-13,0. Причем положительные отклонения относятся к массовой скорости 2000 кг/(м²с) и балансным паросодержаниям $>0,15$.

Рассчитанные по коду ВЯЗ критические тепловые потоки ниже опытных до 10% для B19, а для сборок B18-13,6 и B18-13,0 согласуются с точностью $\pm 5\%$ с экспериментальными, кроме критических тепловых потоков для массовой скорости 2000 кг/(м²с) и балансных паросодержаний $>0,15$, которые выше экспериментальных до 15%.

Рассматриваемые коды практически однозначно определяют место возникновения кризиса теплоотдачи и величину критического теплового потока характером распределения относительных подогревов. Выполняемая верификация кодов по измеренным в экспериментах распределениям относительных подогревов поможет выявить правильность заложенных в программные средства замыкающих соотношений и механизмов тепломассопереноса по сечению пучка.

На рис. 5,6,7 показаны сравнения экспериментальных распределений относительных подогревов, соответственно, для сборок B19, B18-13,6 и B18-13,0 с рассчитанными по кодам ПУЧОК-1000 и ВЯЗ-196.

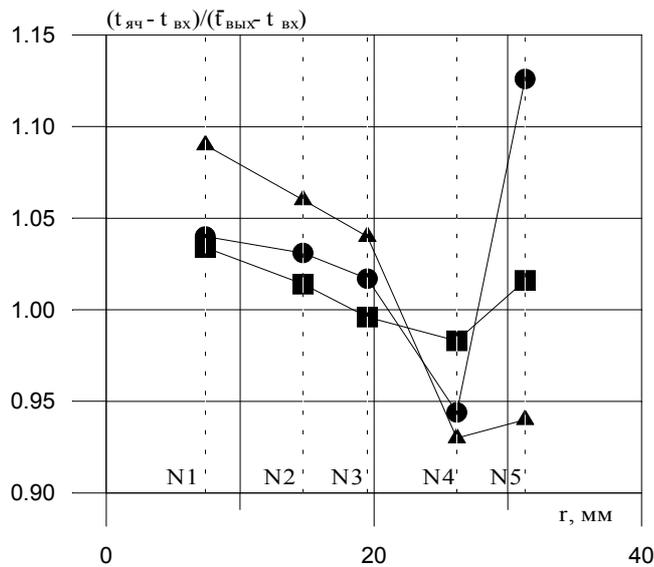


Рис.5. Относительные подогревы в ячейках сборки В19.
 $P=15,7$ МПа; $\rho w=2000$ кг/(м² с); $t_{вх}=150$ °С; $q=500$ кВт/м².

■ - эксперимент; ● - ПУЧОК-1000;
 ▲ - ВЯЗ-196.

Из рисунков видно, что код ПУЧОК-1000 дает подогревы теплоносителя в затесненных угловых и центральных ячейках значительно выше экспериментальных, и поэтому необходима коррекция кода ПУЧОК-1000, прежде всего, по замыкающему соотношению для коэффициента по перемешиванию.

Результаты, полученные по коду ВЯЗ-196, более удовлетворительно согласуются с опытными данными. Для дальнейшего совершенствования расчетных кодов необходимо продолжение исследований и не только по распределению подогревов теплоносителя по сечению ТВС, но и по распределению локальных массовой скорости и паросодержания.

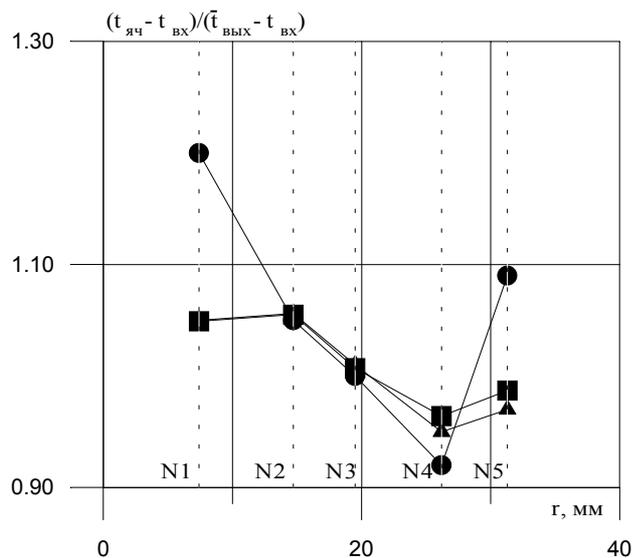


Рис.6. Относительные подогревы в ячейках сборки В18-13,6.
 $P=15,7$ МПа, $\rho w=2000$ кг/(м² с), $t_{вх}=150$ °С, $q=500$ кВт/м².

■ эксперимент; ● ПУЧОК-1000; ▲ ВЯЗ-196.

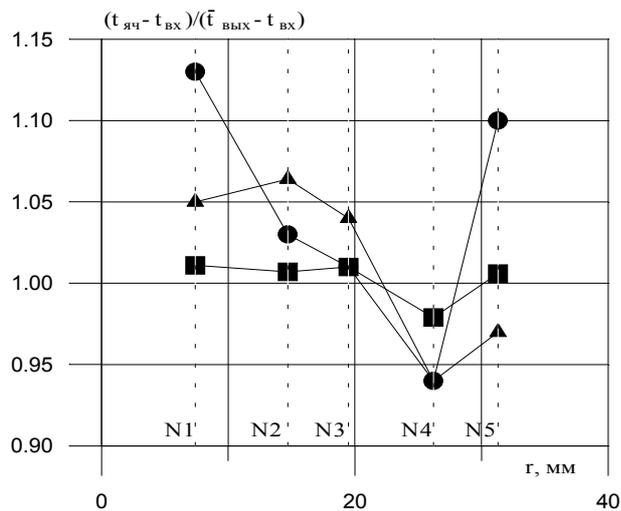


Рис.7. Относительные подогревы в ячейках сборки В18-13,0.
 $P=15,7$ МПа, $\rho_w=2000$ кг/(м² с), $t_{\text{вх}}=150$ °С, $q=500$ кВт/м².

■ эксперимент; ● ПУЧОК-1000; ▲ ВЯЗ-196.

Заключение

1. Экспериментально определены критические тепловые потоки, места возникновения кризиса теплообмена, относительные подогревы в ячейках электрообогреваемых 19-ти стержневых моделей ТВС ВВЭР.

2. Рассчитанные по кодам ПУЧОК-1000 и ВЯЗ-196 критические тепловые потоки в пределах 10-15% совпадают с экспериментальными.

3. Код ВЯЗ-196 удовлетворительно моделирует распределение локальных подогревов по сечению ТВС. Код ПУЧОК-1000 в затесненных угловых и центральных ячейках дает завышенные подогревы, что предопределяет необходимость коррекции этого кода.

4. Для усовершенствования расчетных кодов по моделированию локальных теплогидравлических характеристик в сборках необходимо систематическое исследование по локальным подогревам, массовым скоростям и паросодержаниям в разных областях режимных параметров.

Литература

1. Абрамов В.И. и др. Определение локальных теплогидравлических характеристик и анализ кризисных условий в пучке тепловыделяющих стержней// Труды семинара СЭВ ТФ-74. Исследования критических тепловых потоков в пучках стержней/ Институт атомной энергии им. И.В. Курчатова. М.: 1974. С. 201-208.
2. Ложкин В.В., Колмаков А.П., Смирнов А.М. Расчетно-экспериментальное исследование кризиса теплообмена и локальных подогревов теплоносителя на 19-ти стержневой модели ТВС ВВЭР с центральным необогреваемым стержнем// Труды международной конференции Теплофизика 98. Теплофизические аспекты безопасности ВВЭР/ Обнинск: ГНЦ РФ Физико-энергетический институт им.акад. А.И. Лейпунского, 1998.С.320-329.
3. Groeneveld D.C. et.al. The Effect of Fuel Subchannel Geometry on CHF// NURETH-5. Proceeding of the Fifth International Topical Meeting on Reactor Thermal Hydraulics/ USA, 1992. Vol. III. P. 683-690.
4. Безруков Ю.А. и др. Экспериментальные исследования и статистический анализ данных по кризису теплообмена в пучках стержней для реакторов ВВЭР// Теплоэнергетика. 1976. № 2. С. 80-82.